青藏高原能量、水分循环影响效应

徐祥德[1]　马耀明[2]　孙　婵[1*]　魏凤英[1]
1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 北京 100081
2 中国科学院青藏高原研究所 北京 100101

摘要　青藏高原是世界上总辐射量最高的地区，也是全球超太阳常数的极值区域之一。此处形成了一个“嵌入”对流层中部大气的巨大的热源，可以伸展到自由大气，其超越了世界上任何超级城市群落所产生的中空热岛效应，对全球与区域大气环流系统变化的动力“驱动”产生了难以估计的效应。与地形热力过程季节变化密切相关的亚洲夏季风是世界上范围最广和强度最强的季风；从冬季到早春季节转换过程中，由于太阳辐射的影响造成青藏高原大地形感热的“快速响应”及其相对高值动态移动，在盛夏梅雨及其云降水带前沿线恰好停滞于中国“三阶梯”地形分布山地—平原过渡区。此现象表明，青藏高原可能扮演着夏季风过程陆地—海洋—大气相互作用的关键角色。中国区域低云量与总云量极值区均与青藏高原大江大河的源头（长江、澜沧江、雅鲁藏布江等）、中东部湖泊群与冰川集中区空间分布几乎吻合，这表明“亚洲水塔”形成的关键因素与“世界屋脊”特有的云降水结构不可分割。研究表明，青藏高原大气热源对局地与下游区域云降水过程水汽输送流型等均有显著影响。长江流域降水与全国低云量存在一个明显沿长江流域的带状高相关结构，充分表明长江流域降水与上游“亚洲水塔”“热驱动”以及对流系统具有重要相关关系。从跨赤道经向环流的视角可发现，夏季南、北半球跨赤道气流低层强偏南、高层强偏北气流出现在东亚地区和北美区域两大地形对应的赤道区，这 2 个跨赤道极值区恰与青藏高原、落基山高原位置相对应。青藏高原纬向与经向环流圈结构与区域-全球大气环流相关机制，印证了“世界屋脊”隆起大地形的“热驱动”及其对流活动在全球能量、水分循环的作用。青藏高原特殊水汽三维结构分布和跨半球的纬向和经向大气垂直环流图表明青藏高原对全球尺度大气环流变化的贡献显著。文章进一步以东亚、全球水循环的视角，提出了青藏高原作为全球性大气“水塔”的观念，认为在高原地区一个水塔的“供水”和“蓄水”循环体系，特别是高原地表冰川、积雪和湖泊作为“蓄水池”系统，使得所有的河流可作为“输水管道”，将“水塔”的水向周边区域输送出去，高层大气也提供向外输送的渠道。青藏高原特殊的跨半球大气水分循环可构建“世界水塔”与其周边地

*通讯作者

资助项目：国家重大科学研究计划（2019QZKK0100），国家自然科学基金重大计划（91337000），中国气象科学研究院科技发展基金（2018KJ019），中国气象科学研究院基本科研业务费专项（2018Y008）
修改稿收到日期：2019年10月15日

区独特的水文功能概念，综合描绘了青藏高原“世界水塔”及其地球上一个完整的行星尺度陆地—海洋—大气水分循环物理图像。

关键词 青藏高原，亚洲水塔，大气水分循环，热驱动，机制，物理图像

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.012

青藏高原及周边地区被称为“亚洲水塔”，是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地[1]，在我国气候系统稳定、水资源供应、生物多样性保护等多方面具有重要的生态安全屏障作用[2]。青藏高原是亚洲许多大江大河的发源地，如长江、黄河、印度河、澜沧江（湄公河）和恒河等。这类似青藏高原维持着一个庞大的中空“蓄水池”，其河流水资源为全世界近40%的人口供给生活、农业和工业用水。青藏高原不仅是亚洲与世界著名大江大河的源头，而且是亚洲的湖泊、湿地聚集地[3-5]。在西风气流、东亚季风和印度季风影响下，中低纬海洋暖湿气流水汽来源使青藏高原拥有冰川、积雪、冻土，被誉为地球中低纬度高海拔永久“冻土和山地冰川王国”，构成了可与南极、北极相提并论的地球“第三极”[6]。

世界上96座海拔超过7 000 m的高山中有94座围绕青藏高原分布[7]。青藏高原现代冰川条数占我国现代冰川总条数的80%，冰川面积占我国冰川总面积的84%，冰川冰储量占我国冰川总储量的80%[7]。Lu等[8]的研究表明，冰川融水构成中国青藏高原总径流量的7.2%。数以千计的冰川遍布在这一高原“台地”上，伴随着高原隆起演化形成的大量冰川和积雪，融化的冰川和大气降水源源不断地形成径流持续供应给湖泊与河流[9,10]。青藏高原现有湖泊占我国湖泊总面积的52%，是地球上海拔最高的湖泊群[11,12]。由此，青藏高原被称为“世界屋脊”，青藏高原及其周边地区被称为“亚洲水塔”。

青藏高原特有的江河源头、冰川群、湖泊群均与大气云降水特征分布密切相关。1961—2015年，中国区域低云量与总云量极值区均与青藏高原中东部、东南缘部大江大河的源头（长江、澜沧江、雅鲁藏布江等）、湖泊群与冰川集中区空间分布几乎吻合（图1）。这表明“亚洲水塔”的形成与“世界屋脊”特有的云降水结构不可分割。通过数值模拟试验分析亦可发现，青藏高原隆起的地形高度不仅影响青藏高原中东部（“三江源”等区域）降水空间分布，而且显著调控着青藏高原南坡降水强度。

我们需进一步思考在青藏高原大地形热力强迫及其云降水过程在跨南、北半球的能量、水循环的交换、输送过程扮演着何类角色？青藏高原异常活跃的对流活动与降水频发区中的关键驱动“机制”如何驱动低纬海洋远距离水汽输送，并使青藏高原蕴藏着如此丰富的水资源储量？它是如何将低纬海洋丰富的水汽源与位于对流层中部的“世界屋脊”云降水过程构成跨半球的水循环系统？“亚洲水塔”水资源的大气与全球海洋“供水系统”如何形成有机联系？如何深化认知“亚洲水塔”水分循环过程及其对东亚区域乃至全球的影响，仍是当前大气科学及地学界面临的具有挑战性的问题。

1 大地形热力影响与“放大的海陆差异”效应

众所周知，亚洲夏季风（ASM）是世界上最大和最显著的季风，其强度及其云降水变化可能对全球气候和气候系统产生深远的影响，特别是对南亚和东亚的降水型与洪涝灾害产生重要影响。过去大量的研究试图去解释导致亚洲夏季风的变化原因。许多研究表

明，青藏高原作为亚洲夏季风的主要驱动力[13,14]，季风环流的变化能否反映青藏高原热源的变化？研究认为亚洲古气候环境变化中青藏高原隆起是引起“行星波主导型”过渡到“季风主导型”的关键因素。朱抱真[15]、朱乾根和胡江林[16]的模式研究表明，如果青藏高原不存在，季风雨带将被抑制在亚热带低纬地区。因此，青藏高原的地形作用导致了东亚季风降雨时空分布特征。吴国雄[17]指出，东亚大气环流对青藏高原的表面感热加热起着重要作用；Wu 和 Zhang[13]发现青藏高原的动力作用与“热泵”效应同时对亚洲夏季风有影响。

研究青藏高原大地形热力影响的另一关键而现实的问题仍然是：作为一个巨大的高架大陆，青藏高原大地形是一个伸展到自由大气的巨大“热源柱”，这种“中空加热”季节变化是否可影响亚洲季风云降水时空分布变化？东亚区域梅雨雨带的演进是否存在青藏高原到黄土高原“三阶梯”大地形地—气变化过程热力驱动作用，这些关键物理过程是否影响了梅雨带时空的演变？

东亚区域春夏季季风降水最突出的是“梅雨”，日本称“Baiu”，韩国称“Changma”。“梅雨”一词的起源，是因为中国南方梅子成熟季节与雨季来临不谋而合。在梅雨季节，大范围降水覆盖中国东部、朝鲜半岛和日本，并形成跨日本海雨带。亚洲夏季风区域划分成东亚夏季风和南亚夏季风（印度季风）[19,20]。许多先前的研究还表明，梅雨锋的时空变化反映了季节转换过程中由于海陆热力差异而产生的影响作用。从春到夏的季节转换，海洋大量水汽输送到东亚，为中国及东亚区域梅雨降雨提供充沛的水汽供应；降雨向北扩张，西太平洋副热带高压控制着梅雨雨带的位置和强度[21,22]。

东亚夏季风最显著的特点之一是东亚区域梅雨雨带的演进。春、夏季梅雨雨带在中国东南部，季风降雨每年从 3 月开始，雨区逐月向北部和西北部发展且

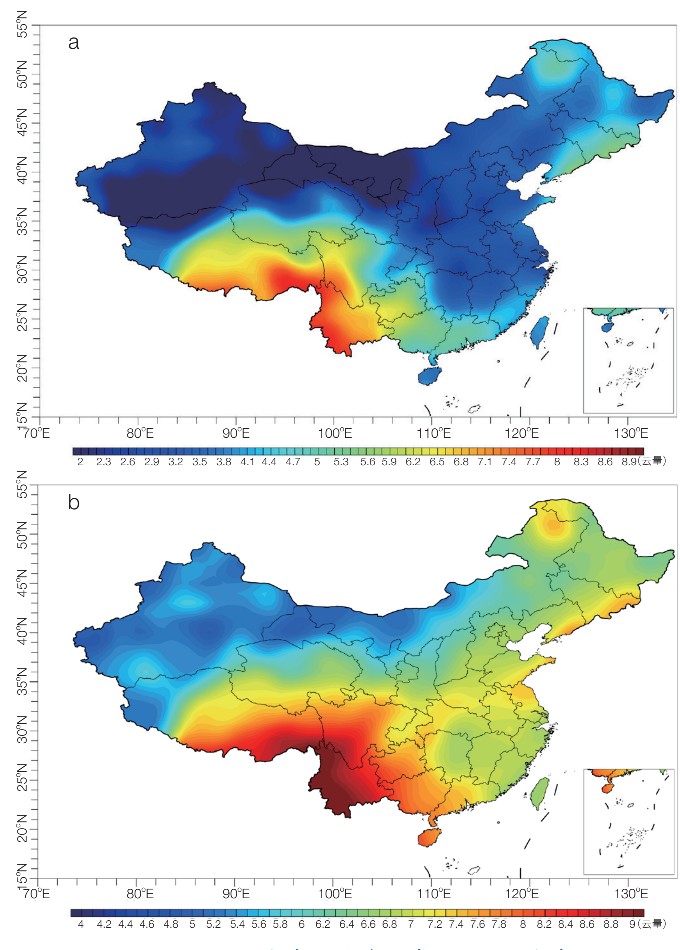


图 1 1961—2015 年中国陆地区域 7 月云量分布
（a）低云量；（b）总云量

面积扩大。每年 7 月，梅雨影响到中国东北北部，但值得注意的是，盛夏梅雨锋突然停滞，且梅雨带北部前沿与中国西部地形线（青藏高原与黄土高原东缘）相吻合；每年 8 月，雨带开始撤退。高原—平原“三阶梯”地形也存在地—气过程动态变化规律，自每年春季 3—4 月起，地气温差与感热“强信号”（高值中心）首先在青藏高原出现。随着春季向夏季过渡，此“强信号”区域逐月扩展到中国北部和东北部。这种大地形地—气过程热力“强信号”区的时空变化随着季节转换，每年 3—7月，陆地大气温差与感热逐月增强，从青藏高原到黄土高原“三阶梯”大地形向东北方向延伸，梅雨及其云降水带亦同步从东南沿海向西北方高原—平原过渡带（青藏高原与黄土高原边缘）移动，两者似乎可归纳是一种“动态的吸引”综合动

态模型。这种大地形地表热力强迫变化和梅雨锋的推进同步响应，在盛夏两者相遇于青藏高原与黄土高原东缘"地形线"[14,18]。

Xu 等[14]揭示了春夏过渡期中国西部青藏高原、黄土高原大地形的热力变化与中国梅雨及其东亚云降水带时空演进的关联性特征，夏半年青藏高原大地形（大于 1 000 m）地、气温差与水汽输送通量相关矢场可清晰地描述出青藏高原热源与东亚、南亚夏季风水汽流型相关特征（图 2）；研究还揭示出随季节变化中国东部季风降水空间分布与前一季（月）青藏高原视热源（地、气温差）呈显著相关的规律[14,23]。这反映从冬到早春季节转换过程由于太阳辐射的影响造成青藏高原大地形感热"快速响应"动态变化。随之，东亚梅雨及其云降水带前沿线亦同步响应，此现象表明青藏高原到黄土高原大地形"热力驱动"可能作为"放大的海陆温差"，扮演着东亚区域夏季风过程陆地—海洋—大气相互作用关键影响角色之一。

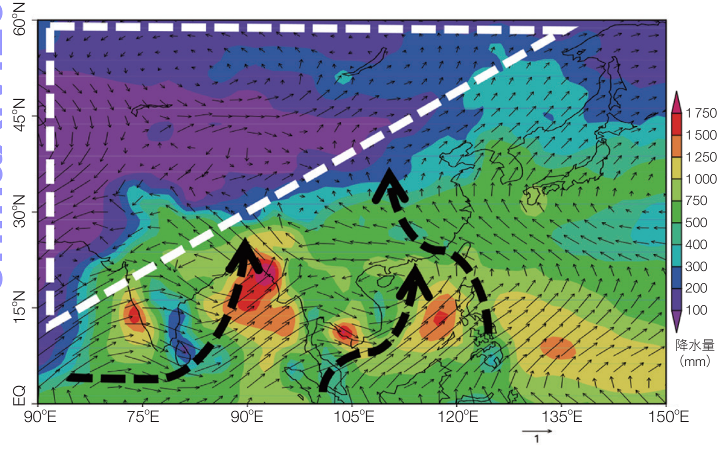


图 2　夏半年青藏高原大于 1 000 m 站点大地形区域地气温差与区域整层水汽通量（qu,qv）相关矢量场，以及东亚夏季降水分布（阴影）综合图[18]

2 "亚洲水塔"影响效应与下游区域云降水时空分布特征

与上述大地形热力过程季节变化密切相关的亚洲夏季风亦是世界上范围最广和强度最强的季风，其变化可能对全球气候和气候系统产生深远的影响[24-26]。

青藏高原被称为"世界屋脊"，占亚洲面积的 1/6。作为占中国国土面积约 1/4 的一个巨大的"高架陆地""平台"，青藏高原是世界上总辐射量最高的地区，高原气温较周边同高度自由大气高出 4℃—6℃，甚至是 10℃[27]。青藏高原形成了一个"嵌入"对流层中部大气的巨大热源，可以伸展到自由大气。一些文献曾提出青藏高原作为"热岛"，其热力强迫影响大气环流结构的观点[13]。青藏高原是全球超太阳常数的极值区域之一。1992 年夏季，在珠穆朗玛峰地区记录到的瞬时总辐射量达到 1 688 W/m^2，超过了太阳常数的 23%[28,29]。这远大于北半球热带和副热带沙漠地区太阳总辐射量极值[7,30]。巨大的太阳辐射热量储存在占中国约 1/4 面积的青藏高原上，成为持续存在的中空热岛，其超越了世界上任何超级城市群落所产生的效应，对全球与区域大气环流系统变化的动力"驱动"产生了难以估计的效应。

夏半年青藏高原上空大气的物理属性与赤道低纬地区有许多相似之处。青藏高原东部夏季旺盛的中尺度对流活动和巨大积雨云向上层大气持续输送着热量和水汽。青藏高原地区作为中国区域积云高频发生地（极值区）之一，第二次青藏高原综合科学考察大气科学试验（TIPEX）中对其当雄边界层加强观测期声雷达资料亦发现窄长的对流热泡特征。从对流云发展动力学视角，在对流边界层中浮力是驱动湍流的主要机制，这种湍流不是完全无规则的，而往往是有组织形成热泡和卷流之类可识别的结构[31,32]。"世界屋脊"高频对流云发展的机制与低空气密度伴随的湍流驱动机制亦存在某种联系。夏季雅鲁藏布江、三江源与高原东南缘区域是中国区域低云量的极值区（图1a）。通过大涡模拟可揭示出低空气密度条件有助于强热力湍流、热泡强上升气流，使得积云更易发展。"世界屋脊"强太阳辐射与空气密度异常区亦是夏季旺盛的对流活动向上层大气持续地输送着热量和水汽，构成了影响东亚区域乃至全球的重

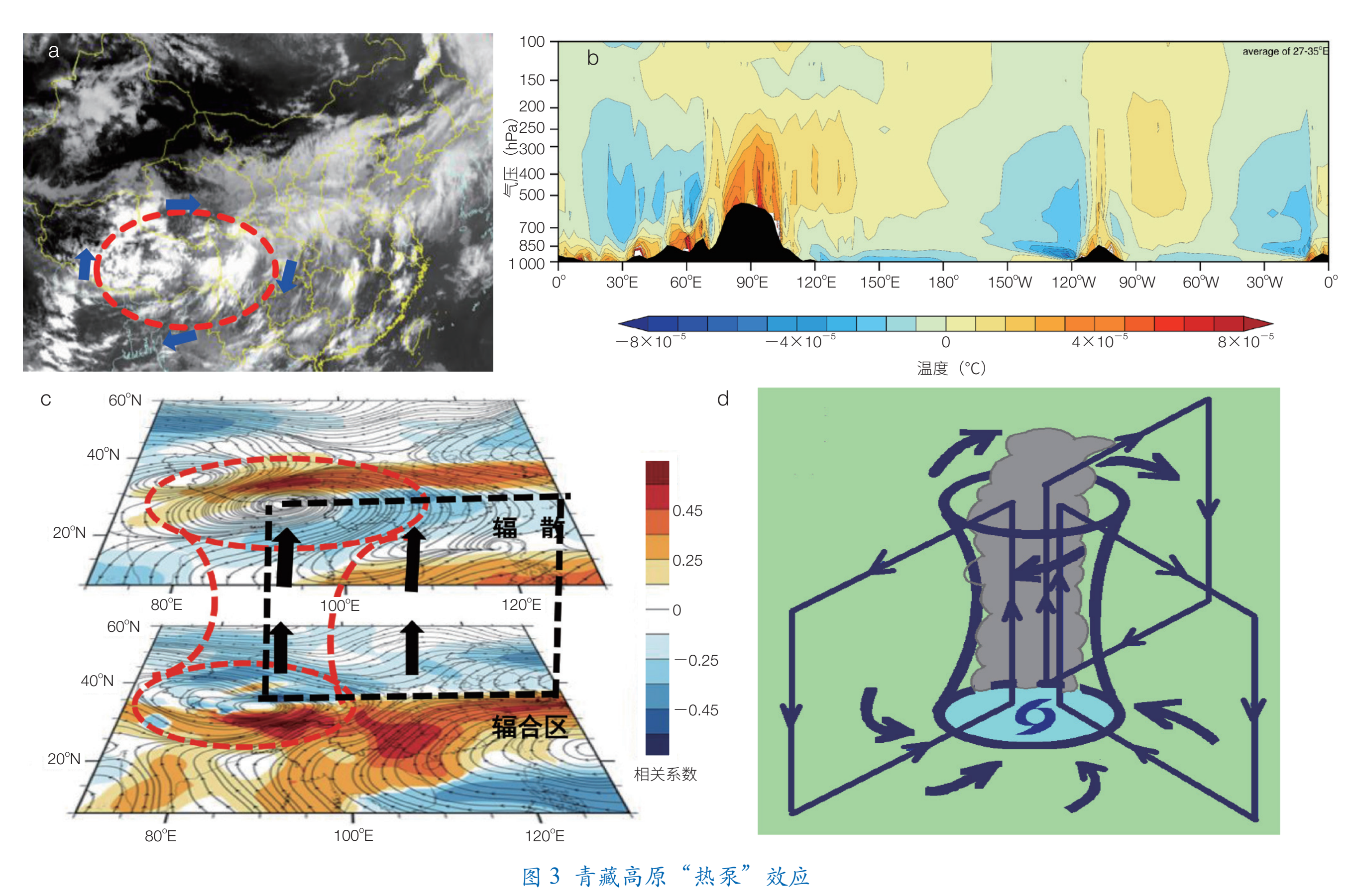


图 3 青藏高原“热泵”效应

（a）风云卫星动态图；（b）1979—2016 年夏季 27.5º—35ºE 东—西气温纬向偏差垂直剖面图；（c）1979—2018 年夏季青藏高原视热源与东亚地区水汽输送通量高（200 hPa）、低层（500 hPa）相关矢场；（d）台风涡旋三维环流结构示意图

要能量与水汽源。

值得探讨的是，卫星遥感动态图像发现上层对流云团往往围绕青藏高原中心做顺时针旋转，显然“亚洲水塔”云降水特征与青藏高原区域此卫星遥感动态图像反气旋环流（高层辐散结构）密切相关联（图 3a）。从视热源纬向偏差东—西垂直剖面图（图 3b）可发现，夏季青藏高原东—西剖面图上，高原随着高度抬升大地形热源特征不仅未削弱，在某些高度还趋于显著。尤其令人惊奇的是青藏高原“中空热岛”300—100 hPa 呈类似台风“自激反馈”机制图像、高层“蘑菇云”“暖区”结构（视热源纬向偏差高值区）显著区。青藏高原为全球唯一视热源“中空热岛”极值区，这一热源结构对高层水汽辐散-低层水汽汇合辐合动力机制维持具有关键作用[32]。另外，全球 500 hPa 以上整层水汽含量场亦可描述出青藏高原为全球唯一的“湿岛”特征，这反映青藏高原亦是全球对流层云降水核心区。

Xu 等[35]通过欧洲中心细网格资料（ERA-Interim资料）发现，视热源与水汽输送通量的相关场低层呈逆时针旋转气旋环流，高层则呈明显为顺时针旋转反气旋环流（图 3c）。上述分析结果揭示出高、低层互为反向环流结构，其类似高层潜热释放的台风“自激反馈”“热泵”效应（图 3d）。此热源与高、低层水汽流相关特征不仅印证了青藏高原这一热驱动形成的三维特殊的涡旋结构对“亚洲水塔”大气水分循环起着核心作用，而且可揭示出此特殊的涡旋结构亦对“亚洲水塔”下游云降水活动起着关键影响效应。图 3c 所示高层此反气旋相关环流系统向东延展，在长江流域上空高层呈东—西反气旋型辐散带；中低层则为东—西辐合带，此类三维环流相关结构有助于在长江流域

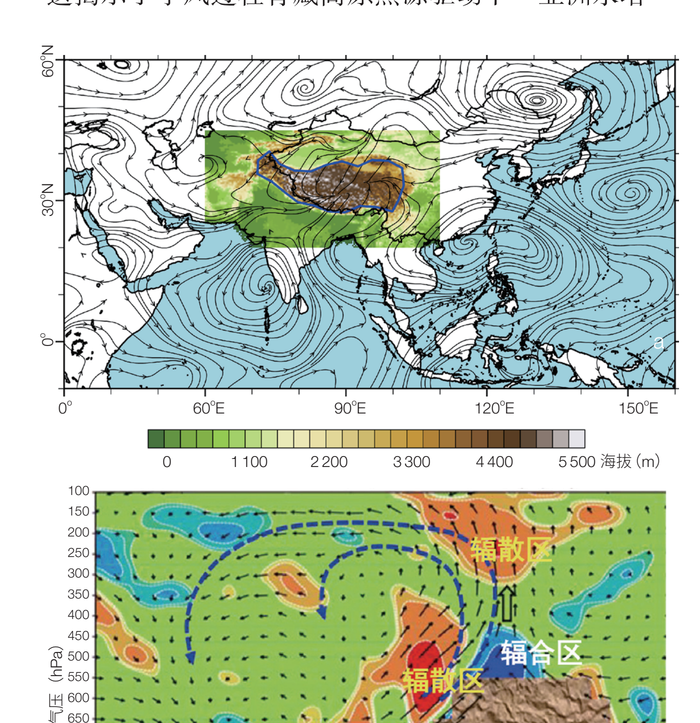
产生降水雨带。

Yasunari 和 Miwa[36]发现夏季在高原热力作用下对流层低层形成了辐合带，随后辐合带在青藏高原东部边缘激发出气旋性涡旋，伴随着充足的水汽输送，气旋性涡旋东移发展在长江中下游上空演变成为中尺度强对流云系统。Zhao 等[33,34]研究表明青藏高原大气热源对局地与下游区域云降水过程水汽输送流型等均呈显著影响；研究统计了 1979—2016 年夏季青藏高原对流源东移轨迹，发现东移至下游长江流域的对流系统可能源于青藏高原，也与前人的研究吻合[37,38]。研究统计长江流域暴雨与特大暴雨（23.4%）发生前期青藏高原上空水汽通量涡旋位移特征，结果发现存在明显的水汽通量涡旋结构东移影响到长江流域异常降水事件。另外，Zhao 等[33]计算亦发现长江流域降水与全国低云量存在从青藏高原延伸至长江下游地区的带状高相关结构。上述研究可综合描述出高原热源驱动相关环流涡旋，尤其高层带状向下游延伸的反气旋型辐散结构亦是“激发”下游及其周边东亚区域云降水及其异常天气灾害事件的关键动力机制之一。

3 “亚洲水塔”低纬海洋水汽型“汇流”效应与跨半球水分循环影响域

在长江洪涝过程中，青藏高原地区中部和东部往往会出现“爆米花”状对流云高频突发现象。青藏高原水汽输送通道及其对流云团亦是影响中国区域旱涝形成的重要因素[35,39]。“亚洲水塔”的水资源“供应区”低纬海洋水汽源区亦是水分循环过程关键影响区。徐祥德等[40]提出了青藏高原与低纬海洋季风活跃区水汽输送“大三角扇形”关键影响域的概念模型。青藏高原大气水分循环过程不仅反映了西风与“大三角扇形”影响域[40]季风水汽输送的相互作用特征，而且描述了跨半球能量、水汽的交换效应。

从夏季青藏高原整层视热源（Q1）与水汽通量相关矢量场（图 4a）可见，青藏高原南侧东起菲律宾以东洋面，经过我国南海，西至东非索马里、阿拉伯海、印度洋（大三角扇形），水汽输送汇流构成了“亚洲水塔”相关的青藏高原南坡“水汽供应区”，这揭示了季风过程青藏高原热源驱动下“亚洲水塔”



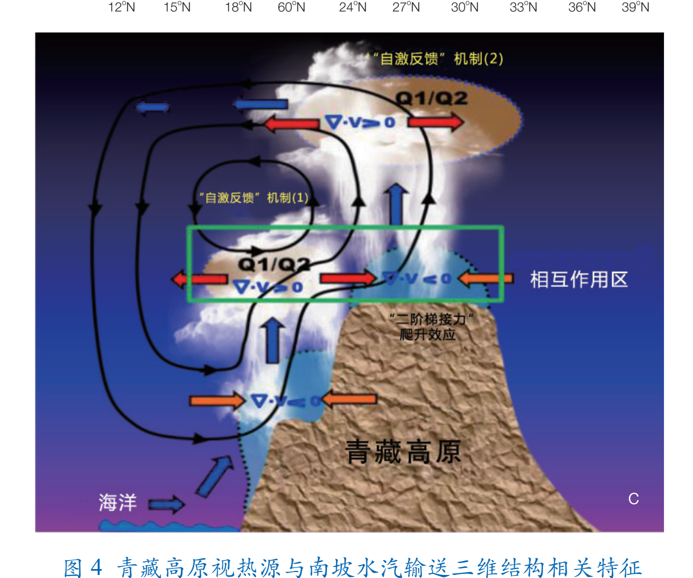


图 4 青藏高原视热源与南坡水汽输送三维结构相关特征

（a）1948—2014 年夏季青藏高原整层视热源（Q1）与水汽通量相关矢量场；（b）夏季青藏高原整层视热源（Q1）与散度相关及经圈相关环流垂直剖面图[39,41]；（c）青藏高原南坡云结构及其视热源相关散度、流场示意图

与中低纬海洋多尺度大气水分循环相互作用机制。

通过青藏高原整层视热源（Q1）与高原区域垂直运动、散度三维相关结构综合分析亦可发现视热源Q1相关散度结构，即南坡低层辐合-坡顶辐散与青藏高原主体低层辐合-上空辐散形成耦合“二阶梯接力”爬升效应。此青藏高原特殊的“热驱动”为陡峭南坡源自低纬海洋乃至跨半球水汽流强“汇流”提供了动力机制（图 4b 和 c）。

上述分析揭示出“亚洲水塔”“中空热岛”热源结构是构成青藏高原与中低纬乃至南半球能量、水分循环的关键动力源，并进一步揭示出“亚洲水塔”特殊的“热驱动”为亚洲乃至跨半球水汽输送提供了重要动力源，使“亚洲水塔”在区域、全球能量、水分循环交换过程中扮演着重要角色。

4 “亚洲水塔”水循环模型及其区域-全球尺度大气能量、水汽交换

有关文献对北半球夏季青藏高原大地形机械屏障和抬升热源的作用有了更深刻的认识。例如，青藏高原的“感热气泵”效应，不仅对亚洲夏季风的维持有重要作用，也通过激发 Rossby 波列对全球气候产生影响[13,42-44]。上述研究结果描述了热源驱动效应为跨半球水汽输送提供了强迫源动力机制[35]。从跨赤道经向环流的视角，研究发现，夏季南、北半球跨赤道气流低层强偏南、高层强偏北气流出现在东亚地区和北美区域两大地形对应的赤道区，这 2 个跨赤道极值区均与亚洲的青藏高原和北美的落基山位置相对应（图 5a 和 b）。但青藏高原高低层反向经向跨赤道气流较落基山显著得多，这印证了地球上大地形隆起状况亦与全球行星尺度垂直环流特征存在某种关联性。

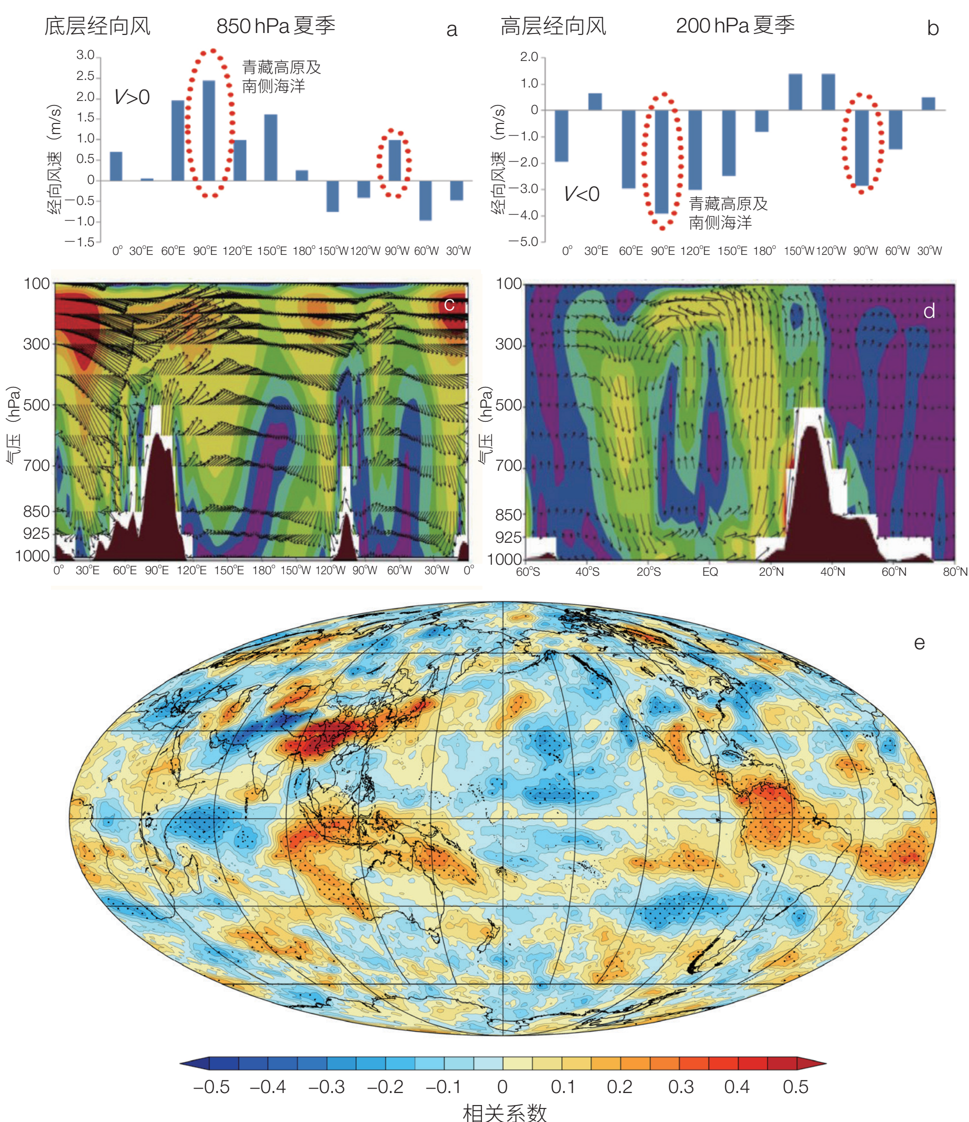


图 5 青藏高原云结构及其跨半球尺度环流区域、全球影响效应

（a）1948—2010 年 30°E—30°W 平均气压 850 hPa 下不同经度（30° 间隔）的夏季经向风速；（b）1948—2010 年 30°E—30°W 平均气压 200 hPa 下不同经度（30° 间隔）的夏季经向风速；（c）1948—2006 年 6—8 月青藏高原平均夏季 27.5°N—35°N 纬度带纬向风速和垂直速度的高度－经度剖面图（彩色阴影为纬向风速和垂直速度的矢量模）；（d）80°E—110°E 经度带经向风速和垂直速度的高度-纬度剖面图（彩色阴影为经向风速和垂直速度的矢量模）[36]；（e）1979—2014 年夏季青藏高原站点平均低云量与全球低云量相关系数场

如图 5c 所示，北半球在夏半年时，位于亚洲的青藏高原和位于北美洲的落基山，这两大地形

均为北半球最为显著上升支区，青藏高原与落基山东侧均有一显著的东—西纬圈环流；其中，青藏高原东侧环流圈呈显著的跨半球尺度特征，落基山东侧环流尺度相对小得多[35]。另外，计算结果亦可描述高原区域为强上升支，呈南—北经圈环流，青藏高原南侧低层呈跨赤道强偏南气流，高层则呈显著的偏北气流，且该支气流下沉区位于南印度洋（图 5d）。青藏高原形成了显著的南—北跨半球尺度经圈环流，在跨半球尺度能量、水分循环的交换、输送过程中起着关键作用[35]。

Xu 等[35]基于青藏高原在亚洲季风系统大气水分循环过程重要地位，进一步以东亚、全球水循环视角来认识青藏高原跨半球环流结构及其全球尺度海洋与大气水循环结构，描述出青藏高原类似全球"水塔"功能及其海洋—大气—陆地—水文过程特殊的相互作用过程。上述青藏高原"亚洲水塔"关键驱动因素（视热源）及整层水汽通量相关矢"汇流"特征（图 4a）、青藏高原大地形南侧低层跨赤道偏南气流（图 5a）和跨半球南北向垂直环流（图 5d）可综合描述出在青藏高原地区源自低纬海洋乃至跨半球水汽流低层强"汇流"与高层强"外流"结构特征，构成了一个"亚洲水塔"跨半球水循环"供水"体系，为青藏高原地表数以千计的冰川和星罗棋布的湖泊群的形成，以及著名的江河源提供了丰富的水汽条件，从而造就

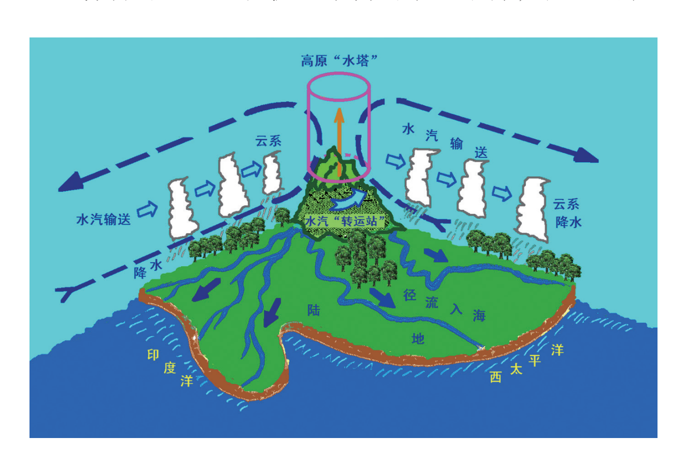


图 6　青藏高原作为陆地—海洋—大气相互作用和水文循环的作用的示意图[26]

了这"世界屋脊"的庞大"蓄水池"系统。而青藏高原的"三江源"等江河源亦可作为"输水管道"系统，使高原冰川、湖泊与湿地"蓄水池"系统通过江河"输水管道"联接下游区域、包括南亚、东南亚等广阔的陆地水文系统乃至太平洋、印度洋。

通过青藏高原低云量与全球低云量的相关场分析（图 5e）亦可发现夏季青藏高原低云活动与北极、太平洋中部，跨洋至北美洲南部低云量呈显著相关区空间分布，尤其由图 5c 可发现青藏高原低云活动高相关区延伸跨赤道至南半球的印度尼西亚、澳大利亚与南美洲等。研究描述出青藏高原对流活动与全球大气云降水活动亦存在显著关联性，这进一步揭示出上述青藏高原纬向与经向环流圈结构与区域-全球大气环流相关机制，印证了"世界屋脊"隆起大地形的"热驱动"及其对流活动在全球能量、水分循环中的作用。上述高层"世界屋脊"特殊跨半球的纬向、经向大气垂直环流图亦描述了"亚洲水塔"通过高层将能量、水汽向外部周边及全球区域输送渠道，其反映青藏高原对全球能量、水分循环亦具有强反馈及其重要影响作用，从而支持了"世界水塔"的概念。图 6 综合描述了青藏高原"世界水塔"及其地球上一个完整的行星尺度陆地—海洋—大气水分循环物理图像[35]。青藏高原与全球大气水分循环过程具有重要的互反馈作用。青藏高原作为"世界水塔"，其大气-水文过程对亚洲乃至全球自然和气候环境将会产生深远的影响。

5 结论

（1）青藏高原热源驱动对亚洲水塔及其下游区域云降水特征呈显著影响。青藏高原是世界上总辐射量最大的地区，是全球超太阳常数的极值区域之一。其形成了一个"嵌入"对流层中部大气的巨大热源，可以伸展到自由大气，这超越了世界上任何超级城市群落所产生的中空热岛效应，对全球与区域大气环流系

统变化的动力“驱动”产生了难以估量的影响。中国区域低云量与总云量极值区均与青藏高原大江大河的源头（如长江、澜沧江、雅鲁藏布江等）、中东部湖泊群和冰川集中区空间分布几乎吻合，这表明“世界屋脊”频发的对流活动是“亚洲水塔”形成的关键因素。研究表明，青藏高原与全国低云量存在一个明显沿长江流域的带状高相关结构，这充分表明长江流域降水与上游高原“亚洲水塔”“热驱动”以及对流系统具有重要相关关系。青藏高原热源驱动构成的高、低层特殊的涡旋三维结构特征不仅印证了热驱动对“亚洲水塔”大气水分循环起着核心作用，而且揭示出青藏高原对下游（如长江流域等）乃至东亚区域云降水活动起着关键影响作用。

（2）季节变化过程青藏高原大地形陆—气过程特征可作为“放大的海陆温差”，其与中国梅雨云降水带时空变化密切相关。亚洲夏季风是世界上范围最广和强度最强的季风，从冬季到早春季节转换过程中，由于太阳辐射的影响造成青藏高原大地形感热的“快速响应”及其相对高值向东北动态移动，伴随着盛夏梅雨云降水带前沿线从东南北移，恰好停滞于中国“三阶梯”地形分布山地—平原过渡区，青藏高原陆—气过程变化与东部梅雨雨带与副热带高压同步变化的季节跳跃演进现象。此规律性现象表明青藏高原大地形热力结构变化可能扮演着影响夏季风云降水过程关键影响角色。由此，提出了春夏过渡期中国西部青藏高原、黄土高原大地形地气过程作为“放大的海陆温差”，其变化影响中国梅雨带云降水带时空变化的前兆性强信号的新认识。

（3）“世界屋脊”“中空热岛”是青藏高原“亚洲水塔”与中低纬乃至南半球能量、水分循环交换的关键“驱动源”。青藏高原特殊的“热驱动”为陡峭南坡源自低纬海洋乃至跨半球水汽流强“汇流”提供了动力机制。青藏高原南侧东起菲律宾以东洋面，经过我国南海，西至东非索马里、阿拉伯海、印度洋（“大三角扇形”），在高原热驱动下青藏高原南坡源自低纬乃至南半球的水汽输送“汇流”构成了“亚洲水塔”的“水汽供应源”，这揭示了季风过程“亚洲水塔”与中低纬海洋多尺度大气水分循环相互作用机制。

（4）隆起的“世界屋脊”大地形“热驱动”环流结构及其云降水特征在全球能量、水分循环过程扮演着的重要角色。从跨赤道经向环流的视角可发现，夏季南、北半球跨赤道气流低层强偏南、高层强偏北气流出现的赤道经度恰与东亚地区和北美区域两大地形——青藏高原、落基山对应。青藏高原纬向与经向环流圈结构与区域-全球大气环流相关机制，印证了“世界屋脊”隆起大地形的“热驱动”及其对流活动在全球能量、水分循环的作用。高原特殊跨半球的纬向和经向大气垂直环流图表明青藏高原大气动力过程对全球尺度大气环流变化的贡献显著。研究可描述出青藏高原对流活动与全球大气云降水活动亦存在显著关联性，通过青藏高原低云量与全球低云量的相关场分析亦可发现夏季青藏高原低云活动与北极、太平洋中部，跨洋至北美洲南部低云量空间分布亦呈显著相关。

（5）青藏高原构成地球上“世界水塔”行星尺度陆地—海洋—大气水循环物理图像。从全球水循环的视角，提出的青藏高原作为全球性大气“水塔”的观念，认为在热力驱动背景下通过区域、跨半球能量、水汽输送建立了青藏高原地区“亚洲水塔”的“供水”“蓄水”与“排水”的循环体系，特别是青藏高原地表冰川，积雪和湖泊作为“蓄水池”系统，江河源可作为“输水管道”，将“亚洲水塔”的水向外输送出去，高层大气也提供向外输送的渠道。青藏高原特殊的跨区域、跨半球大气水分循环可构建“世界水塔”独特的大气-水文功能体系，其综合描绘了青藏高原“世界水塔”及其地球上一个完整的行星尺度陆地—海洋—大气水循环物理图像。

参考文献

1 郑度, 姚檀栋. "青藏高原形成演化及其环境资源效应"研究进展. 中国基础科学, 2004, (6): 15-21.

2 Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulation in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2: 663-667.

3 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.

4 万玮, 肖鹏峰, 冯学智. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化. 科学通报, 2014, 59(8): 701-714.

5 王明达, 侯居峙, 类延斌. 青藏高原不同类型湖泊温度季节性变化及其分类. 科学通报, 2014, 59(31): 3095-3103.

6 Qiu J. China: The third pole. Nature, 2008, 454: 393-396.

7 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变（上卷）: 气候与环境的演变及预测. 北京: 科学出版社, 2005.

8 Lu C X, Yu G, Xie G D. Tibetan Plateau serves as a water tower. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, 2005, 5: 3120-3123.

9 Davis M E, Thompson L G, Yao T, et al. Forcing of Asian monsoon on the Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution ice core and tropical coral record. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: D0410.

10 Duan K, Yao T, Thompson L G. Response of monsoon precipitation in the Himalayas to global warming. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D10110.

11 赵魁义. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社, 1999.

12 李炳元. 青藏高原湖泊演化// 施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆升与环境演化. 广州: 广东科技出版社, 1998: 331-347.

13 Wu G X, Zhang Y. Tibetan Plateau forcing and the Asian Monsoon onset over South Asia and South China Sea. Monthly Weather Review, 1998, 126: 913-927.

14 Xu X D, Lu C, Shi X, et al. The Large-scale topography of China: A factor for seasonal march of the Meiyu-Baiu-Changma in East Asia. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: D02110.

15 朱抱真. 青藏高原对中国气候的影响// 国家科学技术委员会. 中国科学技术蓝皮书第5号: 气候. 北京: 科学技术文献出版社, 1990: 320-324.

16 朱乾根, 胡江林. 青藏高原大地形对夏季大气环流和亚洲夏季风影响的数值试验. 南京气象学院学报, 1993, 16(2): 120-129.

17 吴国雄. 我国青藏高原气候动力学研究的近期进展. 第四纪研究, 2004, 24(1): T001-T004.

18 Xu X D, Shi X Y, Wang Y Q, et al. Data analysis and numerical simulation of moisture source and transport associated with summer precipitation in the Yangtze River Valley over China. Meteorology & Atmospheric Physics, 2008, 100(1-4): 217-231.

19 Ding Y H, Chan J C L. The East Asian summer monsoon: an overview. Meteorology and Atmospheric Physics, 2005, 89(1-4): 117-142.

20 Ding Y H. Monsoons over China. Tranbjerg: Kluwer Academic Publisher, 1994: 419.

21 Tao S, Zhao Y, Chen X. The relationship between May-Yu in far east and the behavior of circulation over aisa. Acta Meteorologica Sinica,1958, 29(2):59-74.

22 任荣彩, 刘屹岷, 吴国雄. 中高纬环流对1998年7月西太平洋副热带高压短期变化的影响机制. 大气科学, 2004, 28(4): 571-578.

23 Xu X D, Lu C X, Ding Y H. What is the relationship between China summer precipitation and the change of apparent heat source over the Tibetan Plateau? Atmospheric Science Letters, 2013, 14(4): 227-234.

24 Zhang R, Jiang D B, Liu X D, et al. Modeling the climate effects of different subregional uplifts within the Himalaya-

Tibetan Plateau on Asian summer monsoon evolution. Chinese Science Bulletin, 2012, 57: 4617.

25 Wang H J, Fan K. Southern Hemisphere mean zonal wind in upper troposphere and East Asian summer monsoon circulation. Chinese Science Bulletin, 2006, 51: 1508.

26 Wu B Y, Huang R H. Lag influences of winter circulation conditions in the tropical western Pacific on South Asian summer monsoon. Chinese Science Bulletin, 2001, 46: 858-858.

27 叶笃正, 陈泮勤. 中国的全球变化预研究（第二部分）. 北京: 地震出版社, 1992: 9-12, 53.

28 章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 青藏高原气象学进展——青藏高原气象科学实验和研究. 北京: 科学出版社, 1988: 268.

29 陆龙骅, 周国贤, 张正秋. 1992年夏季珠穆朗玛峰地区的太阳直接辐射和总辐射. 太阳能学报, 1995, 16: 229-233.

30 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000, 125.

31 Young G S. Turbulence structure of the connective boundary layer Parts Ⅰ&Ⅱ. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(4): 719-726.

32 Young G S. Convection in the atmospheric boundary Layer. Earth Science Reviews, 1988, 25(3): 1-198.

33 Zhao Y, Xu X D, Chen B, et al. The upstream “strong signals” of the water vapor transport over the Tibetan Plateau during a heavy rainfall event in the Yangtze River Basin. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(12): 1343-1350.

34 Zhao Y, Xu X D, Zheng R, et al. Precursory strong-signal characteristics of the convective clouds of the Central Tibetan Plateau detected by radar echoes with respect to the evolutionary processes of an eastward-moving heavy rainstorm belt in the Yangtze River Basin. Meteorology and Atmospheric Physics, 2019, 131(4): 697-712.

35 Xu X D, Lu C G, Shi X Y, et al. World water tower: An atmospheric perspective. Geophysical Research Letters, 2008, 35: 525-530.

36 Yasunari T, Miwa T. Convective cloud systems over the Tibetan Plateau and their impact on meso-scale disturbances in the Meiyu/Baiu frontal zone: A case study in 1998. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2006, 84(4): 783-803.

37 江吉喜, 范梅珠. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统. 大气科学, 2002, 26(2): 263-270.

38 Hu L, Deng D, Gao S, et al. The seasonal variation of Tibetan Convective Systems: Satellite observation. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2016, 121(10): 5512-5525.

39 Xu X D, Zhao T L, Lu C G. Characteristics of the water cycle in the atmosphere of the Tibetan Plateau. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72:1079-1095.

40 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原——季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. 气象学报, 2002, 60: 257-266.

41 Xu X D, Zhao T L, Lu C G, et al. An important mechanism sustaining the atmospheric “water tower” over the Tibetan Plateau. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14: 18255-18275.

42 Duan A M, Wu G X. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau. Geophysical Research Letters, 2006, 33: 217-234.

43 Liu Y M, Bao Q, Duan A M, et al. Recent progress in the impact of the Tibetan Plateau on climate in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24: 1060-1076.

44 Yang K, He J, Tang W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150: 1-46.

Effect of Energy and Water Circulation over Tibetan Plateau

XU Xiangde[1] MA Yaoming[2] SUN Chan[1*] WEI Fengying[1]

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract The total amount of radiation over the Tibetan Plateau (TP) is the largest in the world with an extreme area of super solar constant, where a huge heat source "embedded" in the middle troposphere forms a hollow heat island with the effect exceeding any urban agglomerations in the world and an inestimable driving impact on global and regional changes in atmospheric circulation system. In closely association with the seasonal variations of TP's thermal forcing, the Asian summer monsoon is the most widely in the world with the strongest monsoon intensity. The seasonal changes of solar radiation results in a "rapid response" of sensible heat and its dynamic movement over the TP's large terrain. The advancing cold-rainfall belts of East Asian summer monsoon stop just along the mountain-plain boundary area in China's three ladder terrain distribution, indicating that the TP may play key role in summer monsoon process of air-sea-land interactions. The extreme regions of low cloud cover and total cloud cover over China, the sources of large rivers (Yangtze River, Lancang River, Yarlung Zangbo River, etc.) in the TP and the group of lakes and rivers in central-eastern China are spatially almost consistent, reflecting that an inseparable connection of the formation of "Asian Water Tower" and the unique cloud precipitation structure in the TP. The studies revealed that a significant influence of the TP's atmospheric heat source on the cloud-precipitation and water vapor transport pattern in local and downstream areas. The precipitation in the Yangtze River Reaches has an obvious zonal high correlation structure with the low cloud cover over China, the precipitation in the Yangtze River Reaches has an important relation with the thermal divers of upper TP's Asian Water Tower, and convection system. From the perspective of across-equatorial circulations, it is found that the summertime cross-equatorial lower south and upper-north flows between the northern to southern hemispheric atmosphere appears just in the Asian and the North American regions with the TP and the Rocky Mountains. The TP's zonal and meridional circulation structure and the relevant mechanism of regional and global atmospheric circulation confirm the thermal role of the TP's "roof of the world" and the convection activities in global energy and water circles. The three-dimensional distribution of special water vapor on the TP and the vertical circulation of atmosphere across the hemispheres show that the TP contributes significantly to the change of global atmospheric circulation. A global Water Tower concept in the TP's atmosphere was put forward, and it is believed that the "water supply" and "water storage" system of TP's water tower is built with the "water storage tank" system of the plateau surface glaciers, snow cover and lakes, as well as "water supply pipelines" of rivers transporting water from the water tower to the downstream areas, and the upper atmosphere also provides the channels for outward transport of water vapor from the TP. The TP's special atmospheric water circulation across the hemisphere can establish "water tower of the world" and its surrounding areas the unique hydrological function, which could provide a comprehensive description of physical picture about the TP's "water tower of the world" and the land-sea-air water vapor circulation in global scale.

Keywords Tibetan Plateau (TP), Asian Water Tower, atmospheric water vapor cycle, thermal forcing, mechanism, physical picture

* Corresponding author



徐祥德 中国工程院院士。中国气象科学研究院研究员，博士生导师。长期探索大气动力学理论，从事台风与暴雨、青藏高原水分循环影响、城市大气环境与边界层等领域研究。主持设计与实施多项大气科学国家重大研究计划与观测试验。主持实施的城市环境研究计划2次被世界气象组织评为城市气象领域全球2个先导性示范项目之一，中国气候观测系统设计亦被列入国际范例。提出青藏高原“热力驱动”水分循环综合模型及其“世界水塔”新认知；拓展青藏高原关键区热源结构及天气气候上游“强信号”影响等系列理论，推进城市环境与青藏高原综合监测、预报系统工程建设。发表国内外SCI期刊与核心以上刊物论文约200篇，出版专著11部、编著10部。E-mail: xuxd@cma.gov.cn

XU Xiangde Research fellow, Ph.D. supervisor, Academician of Chinese Academy of Engineering while engaged in long-term exploration of atmospheric dynamics theory, Xu Xiangde focuses his research areas on typhoon and torrential rain, the influence of water cycle on Qinghai-Tibet Plateau, and urban atmospheric environment and boundary layers. He has been in charge of the design and implementation of a number of national key research programs and observation experiments, among which the urban environment research program was awarded twice as one of the two pioneering pilot projects in the field of urban meteorology by WMO. The design of China Climate Observing System, also chaired by Xu, has been named as international examples. He has established the synthetic model of “thermally driven” water cycle on Qinghai-Tibet Plateau and put forward the new conception of “water tower of the world”. Xu Xiangde has also expanded the theories concerning the heat source structure in key areas of Qinghai-Tibet Plateau and the influence of “strong signals” from the weather and climate upstream. He has promoted the system engineering construction of both the urban environment and the integrated monitoring and forecasting on Qinghai-Tibet Plateau. About 200 papers have been published by him, as the lead author or the second author, in SCI journals or core periodicals both domestic and abroad. He has also published 11 monographs and compiled another 10. In recent years, Xu has been invited three times by Nova Science Publishers to be the co-author or the lead author of their publications. One of the monographs published by Nova, Xu as the lead author, has been included in the Library of Congress, USA. E-mail: xuxd@cma.gov.cn



孙 婵 中国气象科学研究院与南京信息工程大学联合培养博士研究生，主要从事青藏高原气候动力方面的研究。E-mail: chan_inspiration@163.com

SUN Chan Jointly trained doctoral candidate of the Chinese Academy of Meteorological Sciences and Nanjing University of Information Science & Technology. She is mainly engaged in the Qinghai-Tibet Plateau climate dynamics research. E-mail: chan_inspiration@163.com

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 郑度, 姚檀栋. 青藏高原形成演化及其环境资源效应研究进展. 中国基础科学, 2004, 6(2): 15-21.

Zheng D, Yao T D. Progress in research on formation and evolution of Tibetan Plateau with its environment and resource effects. China Basic Science, 2004, 6(2): 15-21. (in Chinese)

2 Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

3 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.

Feng S, Tang M C, Wang D M. The Qinghai-Tibet Plateau is new evidence of China's climate change initiation zone. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636. (in Chinese)

4 万玮, 肖鹏峰, 冯学智. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化. 科学通报, 2014, 59(8): 701-714.

Wan W, Xiao P F, Feng X Z. Satellite remote sensing monitoring of lake changes in the Qinghai-Tibet Plateau in the past 30 years. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(8): 701-714. (in Chinese)

5 王明达, 侯居峙, 类延斌. 青藏高原不同类型湖泊温度季节性变化及其分类. 科学通报, 2014, 59(31): 3095-3103.

Wang M D, Hou J Z, Lei Y B. Seasonal variation and classification of different lake temperatures on the Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(31): 3095-3103. (in Chinese)

6 Qiu J. China: The third pole. Nature, 2008, 454: 393-396.

7 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变（上卷）：气候与环境的演变及预测. 北京: 科学出版社, 2005.

Qin D H, Ding Y H, Su J L, et al. Climate and Environmental Evolution in China (Volume I): Evolution and Prediction of Climate and Environment. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

8 Lu C X, Yu G, Xie G D. Tibetan Plateau serves as a water tower. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, 2005, 5: 3120-3123.

9 Davis M E, Thompson L G, Yao T, et al. Forcing of Asian monsoon on the Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution ice core and tropical coral record. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: D0410.

10 Duan K Q, Yao T D, Thompson L G. Response of monsoon precipitation in the Himalayas to global warming. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D10110.

11 赵魁义. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社, 1999.

Zhao K Y. Chinese Swamp Chronicles. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)

12 李炳元. 青藏高原湖泊演化// 施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆升与环境演化. 广州: 广东科技出版社, 1998: 331-347.

Li B Y. Lake evolution on the Qinghai-Tibet Plateau// Shi Y F, Li J J, Li B Y. Late Cenozoic Uplift and Environmental Changes in the Qinghai-Tibet Plateau. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998: 331-347. (in Chinese)

13 Wu G X, Zhang Y S. Tibetan Plateau forcing and the Asian Monsoon onset over South Asia and South China Sea. Monthly Weather Review, 1998, 126: 913-927.

14 Xu X D, Lu C, Shi X, et al. The Large-scale topography of China: A factor for seasonal march of the Meiyu-Baiu-Changma in East Asia. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: D02110.

15 朱抱真. 青藏高原对中国气候的影响// 国家科学技术委员会. 中国科学技术蓝皮书第5号：气候. 北京: 科学技术文献出版社, 1990: 320-324.

Zhu B Z. The influence of Qinghai-Tibet Plateau on China's climate// State Scientific and Technological Commission of the People's Republic of China. China Science and Technology

Blue Book No. 5: Climate. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1990: 320-324. (in Chinese)

16 朱乾根, 胡江林. 青藏高原大地形对夏季大气环流和亚洲夏季风影响的数值试验. 南京气象学院学报, 1993, 16(2): 120-129.

Zhu Q G, Hu J L. Numerical experiments on the influences of the Qinghai-Xizang Plateau topography on the summer general circulation and the Asian summer monsoon. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1993, 16(2): 120-129. (in Chinese)

17 吴国雄. 我国青藏高原气候动力学研究的近期进展. 第四纪研究, 2004, 24(1): 1-9.

Wu G X. Recent progress in the study of the Qinghai-Xizang Plateau climate dynamics in China. Quaternary Sciences, 2004, 24(1): 1-9. (in Chinese)

18 Xu X D, Shi X Y, Wang Y Q, et al. Data analysis and numerical simulation of moisture source and transport associated with summer precipitation in the Yangtze River Valley over China. Meteorology and Atmospheric Physics, 2008, 100(1-4): 217-231.

19 Ding Y H, Chan J C L. The East Asian summer monsoon: An overview. Meteorology and Atmospheric Physics, 2005, 89(1-4): 117-142.

20 Ding Y H. Monsoons over China. Tranbjerg: Kluwer Academic Publisher, 1994: 419.

21 Tao S, Zhao Y, Chen X. The relationship between May-Yu in far east and the behavior of circulation over aisa. Acta Meteorologica Sinica,1958, 29(2):59-74.

22 任荣彩, 刘屹岷, 吴国雄. 中高纬环流对1998年7月西太平洋副热带高压短期变化的影响机制. 大气科学, 2004, 28(4): 571-578.

Ren R C, Liu Y M, Wu G X. On the short-term variation of subtropical anticyclone over the western Pacific affected by the mid-high latitudes circulation in July 1998. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(4): 571-578. (in Chinese)

23 Xu X D, Lu C G, Ding Y H. What is the relationship between China summer precipitation and the change of apparent heat source over the Tibetan Plateau?. Atmospheric Science Letters, 2013, 14(4): 227-234.

24 Zhang R, Jiang D B, Liu X D, et al. Modeling the climate effects of different subregional uplifts within the Himalaya-Tibetan Plateau on Asian summer monsoon evolution. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(35): 4617-4262.

25 Wang H J, Fan K. Southern Hemisphere mean zonal wind in upper troposphere and East Asian summer monsoon circulation. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(12): 1508-1514.

26 Wu B Y, Huang R H. Lag influences of winter circulation conditions in the tropical western Pacific on South Asian summer monsoon. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(10): 858-861.

27 叶笃正, 陈泮勤. 中国的全球变化预研究（第二部分）. 北京: 地震出版社, 1992: 9-12, 53.

Ye D Z, Chen P Q. Pre-research on Global Change in China (Part II). Beijing: Seismological Press, 1992: 9-12, 53. (in Chinese)

28 章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 青藏高原气象学进展——青藏高原气象科学实验和研究. 北京: 科学出版社, 1988: 268.

Zhang J J, Zhu B Z, Zhu F K, et al. Advances in Qinghai-Tibet Plateau Meteorology—Scientific Experiments and Research on Qinghai-Tibet Plateau Meteorology. Beijing: Science Press, 1988: 268. (in Chinese)

29 陆龙骅, 周国贤, 张正秋. 1992年夏季珠穆朗玛峰地区的太阳直接辐射和总辐射. 太阳能学报, 1995, 16(3): 229-233.

Lu L H, Zhou G X, Zhang Z Q. Direct and global solar radiations in the region of Mt. Qomolangma during the summer 1992. Acta Energiae Solaris Sinica, 1995, 16(3): 229-233. (in Chinese)

30 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000: 125.

Zhou M Y, Xu X D, Bian L G, et al. Observational Analysis and Dynamics Study of the Atmospheric Boundary Layer on the Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 125. (in Chinese)

31 Young G S. Turbulence structure of the connective boundary layer Parts I&II. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(4): 719-726.

32 Young G S. Convection in the atmospheric boundary layer. Earth Science Reviews, 1988, 25(3): 179-198.

33 Zhao Y, Xu X D, Chen B, et al. The upstream "strong signals" of the water vapor transport over the Tibetan Plateau during a heavy rainfall event in the Yangtze River Basin. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(12): 1343-1350.

34 Zhao Y, Xu X D, Ruan Z, et al. Precursory strong-signal characteristics of the convective clouds of the Central Tibetan Plateau detected by radar echoes with respect to the evolutionary processes of an eastward-moving heavy rainstorm belt in the Yangtze River Basin. Meteorology and Atmospheric Physics, 2019, 131(4): 697-712.

35 Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. World water tower: An atmospheric perspective. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): 525-530.

36 Yasunari T, Miwa T. Convective cloud systems over the Tibetan Plateau and their impact on meso-scale disturbances in the Meiyu/Baiu frontal zone: A case study in 1998. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2006, 84(4): 783-803.

37 江吉喜, 范梅珠. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统. 大气科学, 2002, 26(2): 263-270.

Jiang J X, Fan M Z. Convective clouds and mesoscale convective systems over the Tibetan Plateau in summer. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(2): 263-270. (in Chinese)

38 Hu L, Deng D F, Gao S T, et al. The seasonal variation of Tibetan Convective Systems: Satellite observation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(10): 5512-5525.

39 Xu X D, Zhao T L, Lu C G. Characteristics of the water cycle in the atmosphere over the Tibetan Plateau. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72:1079-1095.

40 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原——季风水汽输送"大三角扇型"影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. 气象学报, 2002, 60(3): 257-266.

Xu X D, Tao S Y, Wang J Z, et al. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-Monsoon "large triangle" affecting region and drought-flood abnormality of China. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(3): 257-266. (in Chinese)

41 Xu X, Zhao T, Lu C, et al. An important mechanism sustaining the atmospheric "water tower" over the Tibetan Plateau. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(20): 11287-11295.

42 Duan A M, Wu G X. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau. Geophysical Research Letters, 2006, 33(22): 217-234.

43 Liu Y M, Bao Q, Duan A M, et al. Recent progress in the impact of the Tibetan Plateau on climate in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(6): 1060-1076.

44 Yang K, He J, Tang W J, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.